

## Закономерности в пространственной ориентации и положении флюидопроводящих естественных трещин в окрестностях крупных разломов

Н.В. Дубиня<sup>1</sup>, к.ф.-м.н.

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Адрес для связи: Dubinya.NV@gmail.com

**Ключевые слова:** трещиноватые карбонатные коллекторы, трехмерное геомеханическое моделирование, критически напряженные трещины

Рассмотрена проблема моделирования трещиноватости, развивающейся в карбонатных породах в окрестности крупного разлома. Рассмотрено влияние разлома на основные закономерности, наблюдаемые в тенденциях изменения предпочтительной пространственной ориентации и положении естественных трещин. Отдельное внимание уделено возможности выделения из всего множества трещин флюидопроводящих. Такое выделение выполнено на основании используемой в геомеханических исследованиях гипотезы о наличии связи по критически напряженным и флюидопроводящим трещинам.

Представлен алгоритм, согласно которому результаты трехмерного геомеханического моделирования могут быть использованы для определения относительного количества флюидопроводящих трещин и их предпочтительной пространственной ориентации. При использовании этого алгоритма параметры напряженного состояния напрямую пересчитаны в возможные значения азимутов и углов наклона тех трещин, которые являются флюидопроводящими при текущем напряженном состоянии.

Работа предложенного алгоритма проказана на ряде синтетических моделей коллекторов, характеризующихся наличием крупного разлома. Исследовано, каким образом пространственная ориентация разлома и его геодинамический тип влияют на тенденции изменения предпочтительной пространственной ориентации и расположения флюидопроводящих трещин по мере приближения к разлому. Показано, как по мере приближения к разлому увеличивается количество трещин, являющихся флюидопроводящими, а их предпочтительная пространственная ориентация оказывается напрямую связанной с ориентацией разлома относительно направлений действия тектонических напряжений. При этом установлено, что разломы различных типов по-разному влияют на закономерности пространственной ориентации и положения трещин. Полученные результаты находятся в соответствии с результатами аналогичных работ, выполненных для одного из нефтегазовых месторождений России.

Представленный в работе алгоритм использования результатов геомеханического моделирования для построения модели трещиноватости с возможностью выделения флюидопроводящих трещин существенно расширяет возможности геомеханики для решения задач оптимизации разработки трещиноватых коллекторов. Выявленные закономерности развития зон трещиноватости позволяют уточнить преимущественные направления фильтрации в таких коллекторах, что ведет к последующему повышению качества гидродинамической модели.

## Tendencies in hydraulically conductive natural fractures' spatial orientations and distribution in vicinities of major faults

N.V. Dubinya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, RF, Moscow

E-mail: Dubinya.NV@gmail.com

**Keywords:** fractured carbonate reservoir rock, 3D geomechanical modeling, critically stressed fractures

The article is devoted to the problem of modeling the fractures emerging in carbonate rocks in vicinity of a major fault. The influence of the fault on the main tendencies in preferable spatial orientation and distribution of natural fractures is considered. The possibility of distinguishing hydraulically conductive fractures among all the variety of fractures is particularly studied. Such a distinction is carried out based on the hypothesis of a relationship between hydraulically conductive and critically stressed natural fractures, used in geomechanical studies.

An algorithm for using the results of three-dimensional geomechanical modeling may be used for determining the relative amount of hydraulically conductive fractures and their preferable spatial orientation is presented in the paper. According to this algorithm, the stress state parameters are directly used to calculate the possible values of azimuthal and dip angles of fractures, which are hydraulically conductive under the current stress state.

The effectiveness of the suggested algorithm is demonstrated for an array of synthetic models of reservoirs with a major fault in presence. The effect of the fault's spatial orientation and geodynamic type on the tendencies of changes in preferable spatial orientation and distribution of hydraulically conductive fractures while approaching the fault is particularly studied. It is shown, that as long as distance to the fault decreases, the relative amount of hydraulically conductive fractures increases, while their preferable spatial orientation appears to be closely related to fault's spatial orientation with respect to the directions of principal tectonic stresses. It is also shown that faults of varied type have different effects on tendencies in spatial orientations and distribution of hydraulically conductive fractures. The obtained results appear to be in a good agreement with the results of analogous studies carried out for one Russian oil field.

The proposed algorithm of using the results of geomechanical modeling for constructing a fracture model with a possibility of distinguishing hydraulically conductive fractures broadens the possibilities of geomechanics for increasing the efficiency of fractured reservoirs' development. The found tendencies of fracture zones' dynamics make it possible to increase the accuracy of forecasting the preferable filtration directions, increasing the quality of hydrodynamic model.

В статье рассмотрена проблема эффективной разработки месторождений углеводородов, в которых насыщенные породы характеризуются развитой естественной трещиноватостью. В таких коллекторах именно системы естественных трещин вносят значительный вклад в эффективные фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) коллектора, поскольку обеспечивают каналы фильтрации. Однако не любая единичная естественная трещина способна проводить флюид: для того, чтобы трещина могла служить каналом фильтрации, флюид должен быть способен двигаться между берегами трещины, а трещина неизбежно должна быть связана с другими трещинами. Только при выполнении этих двух условий единичная трещина будет вносить существенный вклад в фильтрационные свойства. Как результат, для того, чтобы наиболее корректно прогнозировать разработку трещиноватых коллекторов, необходимо не только использовать данные различных

исследований (сейсмических, геофизических (ГИС)) и результаты лабораторных экспериментов на керновом материале для поиска зон развитой трещиноватости, но и иметь возможность разделять трещины на флюидопроводящие и не флюидопроводящие. В данной статье поиск решения этой задачи осуществлен с помощью подходов геомеханики месторождений, в частности, к изучению напряженно-деформированного состояния коллектора.

С позиций геомеханики разделение трещин на флюидопроводящие и не флюидопроводящие выполняется с использованием понятия критически напряженных трещин. Критически напряженной называется такая трещина, на поверхности которой действует касательное напряжение, достаточно большое, чтобы вдоль ее поверхности был возможен сдвиг. Для отнесения трещины к классу критически напряженных необходимо знать коэффициент трения породы, нормальное и касательное напряжения, действующие на поверхности трещины, которые, в свою очередь, могут быть определены, если известны компоненты тензора напряжений, действующих в окрестности трещины, и ее пространственная ориентация. Впервые концепция критически напряженных трещин предложена в работе [1], в которой рассмотрена скважина с высоким качеством записи результатов ГИС и высокой достоверностью построенной геомеханической модели. Авторы разделили трещины на критически напряженные и не критически напряженные, после чего было обнаружено, что подавляющее большинство критически напряженных трещин являются флюидопроводящими (флюидопроводимость определена с помощью расширенного комплекса ГИС в той же скважине) и наоборот. Как результат, была сформулирована следующая гипотеза: трещины, являющиеся критически напряженными в текущем напряженном состоянии, имеют тенденцию быть также и флюидопроводящими, и наоборот. Эта гипотеза нашла подтверждение на разных объектах [2–7] и в настоящее время иногда используется следующим образом. На основании данных ГИС строятся одномерные геомеханические модели, содержащие профили компонент тензора напряжений вдоль скважины, которые используются для прогноза положения зон развитой трещиноватости, содержащих критически напряженные и, соответственно, флюидопроводящие трещины [8, 9]. В работе [10] показано, каким образом аналогичная задача может быть решена в трехмерной постановке на основании результатов трехмерного геомеханического моделирования и данных сейсмических исследований. Полученные в результате выполнения геомеханического моделирования кубы напряжений могут быть использованы для того, чтобы определить возможные пространственные ориентации и относительную плотность флюидопроводящих трещин в каждом элементе расчетной геомеханической модели. Эти параметры флюидопроводящих трещин далее применяются для петроупругого моделирования и построения динамической модели трещиноватости, позволяющей прогнозировать развитие зон флюидопроводящей трещиноватости при разработке месторождения. В процессе выполнения работы [10], проводившейся для конкретного месторождения, обнаружены опре-

деленные закономерности в пространственной ориентации и положении флюидо-проводящих трещин по мере приближения к крупным разломам. В то же время эти закономерности различались для разных разломов. В данной статье рассмотрены указанные различия. Ее целью является исследование закономерностей в пространственной ориентации и положении флюидо-проводящих трещин в окрестностях крупных разломов и выделение связей этих закономерностей со свойствами разломов и их пространственной ориентацией относительно направлений действия региональных напряжений.

### Постановка задачи

Для того, чтобы отнести некоторую трещину к классу критически напряженных, необходимо, как было указано выше, определить параметры напряженного состояния в ее окрестности и ее пространственную ориентацию. Согласно работе [2] трещина является критически напряженной, если для нее выполняется неравенство  $\tau_n \geq \mu \sigma_n$  ( $\tau_n, \sigma_n$  – соответственно касательное и нормальное напряжение, действующее на поверхности трещины;  $\mu$  – коэффициент трения пород, вмещающих трещину). Эти напряжения согласно работе [7] определяются как

$$\begin{cases} \sigma_n = \sigma_2 + l^2(\sigma_1 - \sigma_2) + n^2(\sigma_3 - \sigma_2), \\ \tau_n = \sqrt{\left(\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}\right)^2 + l^2(\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_1 - \sigma_3) - \left(\sigma_n - \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2}\right)^2}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – соответственно наибольшее, промежуточное и наименьшее главное напряжение (сжимающие напряжения здесь и далее считаются положительными);  $l, n$  – косинус угла между нормалью к трещине и направлениями действия соответственно  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ .

Известные значения главных напряжений из выражения (1) можно подставить в условие критической напряженности трещины и получить условие

$$\frac{\sqrt{l^2(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + n^2(\sigma_2 - \sigma_3)^2 - (l^2(\sigma_1 - \sigma_2) + n^2(\sigma_3 - \sigma_2))^2}}{\sigma_2 + l^2(\sigma_1 - \sigma_2) + n^2(\sigma_3 - \sigma_2)} \geq \mu, \quad (2)$$

которое определяет все возможные значения направляющих косинусов  $l$  и  $n$ , которые задают пространственную ориентацию критически напряженных трещин по значениям главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2$  и  $\sigma_3$  и коэффициента трения. При известной пространственной ориентации главных осей тензора напряжений эти косинусы могут быть пересчитаны в азимутальные углы и углы падения трещин, которые являются критически напряженными в текущем поле напряжений.

Обычно для того, чтобы определить текущее поле напряжений, в рамках геомеханического моделирования решаются основные уравнения пороупругости – уравнения равновесия, условия совместности деформаций, реологические соотношения и уравнения фильтрации [11]. На практике существуют различные подходы к решению этой системы [12]. В данной статье используется расчет совмещенной системы уравнений геомеханики и гидродинамики с помощью метода конечных элементов по методике, описанной в работе [13]. В рамках этого подхода для создания геомеханической модели строится расчетная сетка, основанная на геологической модели. Каждый элемент сетки заполняется физико-механическими свойствами, на достаточно большом удалении от рассматриваемого объекта ставятся граничные условия на напряжения таким образом, чтобы обеспечить максимальное соответствие между результатами трехмерного моделирования и одномерными профилями напряжений вдоль опорных скважин. Далее выполняется поиск полей напряжений и деформаций, удовлетворяющих всем перечисленным выше уравнениям и граничным условиям.

Расчеты полей напряжений выполнены на синтетических моделях месторождений с разломами. Схема расчета показана на рис. 1 (вид сбоку). Вся расчетная область представляет собой прямоугольный параллелепипед с вертикальным сечением  $GHJI$ , внутри которого расположена исследуемая залежь с сечением  $ABCD$  с разломом сечением  $EF$ . На боковые стороны расчетной области действуют горизонтальные напряжения  $\sigma_h(z)$  и  $\sigma_H(z)$ , линейно возрастающие с глубиной, вся модель подвержена действию вертикально направленной силы тяжести. Верхняя грань  $GH$  свободна от нагрузок (дневная поверхность), на нижней грани ставится условие отсутствия смещений в вертикальном направлении и поворотов вокруг горизонтальных осей. Предполагается, что рассматриваемые среды упругопластические, переход в пластическую область происходит при выполнении линейного критерия Кулона – Мора.

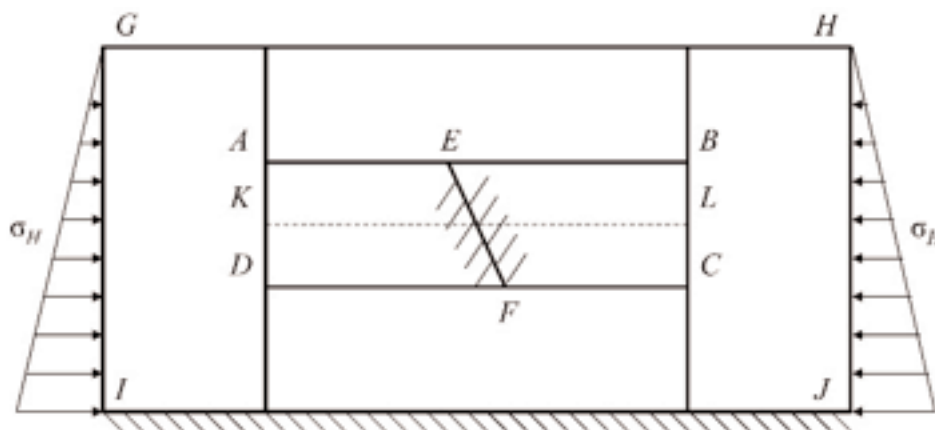


Рис. 1. Схема расчетной области для геомеханического моделирования



Разлом  $EF$  представляет собой произвольно ориентированную плоскость, вдоль которой может произойти скольжение, если напряжения, действующие поверхности разлома, удовлетворяют условию  $\tau_n \geq \mu^* \sigma_n$  ( $\mu^*$  – коэффициент трения на поверхности разлома, как правило, эта величина меньше, чем эффективный коэффициент трения в ненарушенной породе  $\mu$ ).

Граничные условия  $\sigma_h(z)$  и  $\sigma_H(z)$  обеспечивают то, что на глубине залегания залежи действуют горизонтальные напряжения  $\sigma_h$  и  $\sigma_H$ , а сила тяжести – вертикальное напряжение  $\sigma_V$ . Соотношение между этими величинами определяет геодинамический тип в регионе: условие  $\sigma_V \geq \sigma_H \geq \sigma_h$  обеспечивает обстановку формирования сбросов,  $\sigma_H \geq \sigma_V \geq \sigma_h$  – сдвигов,  $\sigma_H \geq \sigma_V \geq \sigma_h$  – взбросов. При этом в первом случае образуются разломы, нормали к которым составляют с вертикалью углы около  $60^\circ$ , во втором – вертикальные разломы, а в третьем – разломы, нормали к которым составляют с вертикалью углы около  $30^\circ$  [14]. При этом если на достаточно большом удалении от разлома напряжения  $\sigma_V$ ,  $\sigma_H$  и  $\sigma_h$  можно считать главными, то в окрестности разлома происходит искривление траекторий главных напряжений и пространственная ориентация направлений действия  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  оказывается связана с ориентацией разлома.

Рассмотрим расчет возможных пространственных ориентаций критически напряженных (и соответственно флюидопроводящих) трещин в окрестности разлома. Различные комбинации граничных условий –  $\sigma_V$ ,  $\sigma_H$  и  $\sigma_h$  – обеспечивают разные текущие геодинамические режимы и разломы различной кинематики – сбросы, сдвиги и взбросы, соответствующие тектонической обстановке на момент своего образования. При этом исследуем, какие закономерности наблюдаются в пространственной ориентации и положении критически напряженных трещин при движении вдоль линии  $KL$ , проходящей через центр разлома (см. рис. 1).

### **Результаты математического моделирования**

Расчеты напряженного состояния синтетической модели выполнены для различных комбинаций значений напряжений и пространственной ориентации разлома. Выбраны следующие типовые механические свойства пород: плотность –  $2600 \text{ кг/м}^3$ , модуль Юнга –  $20 \text{ ГПа}$ , коэффициент Пуассона –  $0,3$ , коэффициент трения  $\mu = 0,6$ . Коэффициент трения на разломе  $\mu^* = 0,2$ . Граничные условия выбраны таким образом, чтобы обеспечивать на глубине залегания залежи на достаточном расстоянии от разлома главные напряжения  $\sigma_1 = 70 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_2 = 30 \text{ МПа}$  и  $\sigma_3 = 20 \text{ МПа}$ . Пространственная ориентация разломов задавалась с помощью угла  $\alpha$  между нормалью к разлому и направлением действия наибольшего главного напряжения. На рис. 2 показано, каким образом определялся угол  $\alpha$  для разломов разных типов.

На рис. 3 приведены результаты расчета напряженного состояния для разлома сбросового типа в обстановке  $\alpha = 60^\circ$ ,  $\sigma_1 = \sigma_V$ ,  $\sigma_2 = \sigma_H$ ,  $\sigma_3 = \sigma_h$ . Представлено сечение модели вертикальной плоскостью, содержащей направления действия  $\sigma_h$  и  $\sigma_V$ .

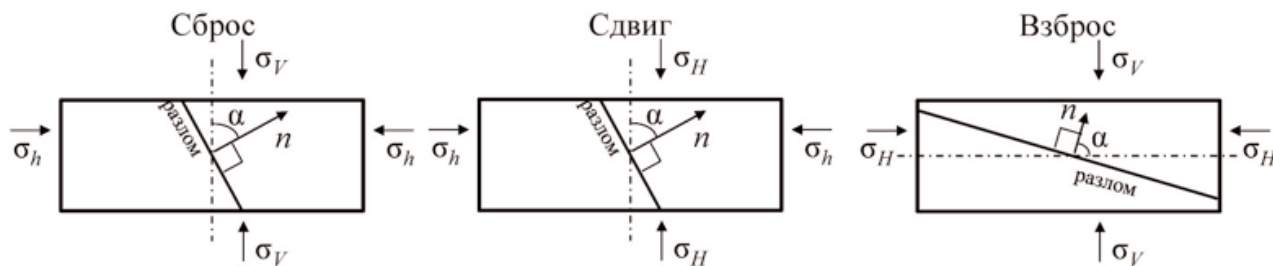


Рис. 2. Выбор угла  $\alpha$  для определения пространственной ориентации разломов разных типов ( $n$  – нормаль к плоскости разлома)

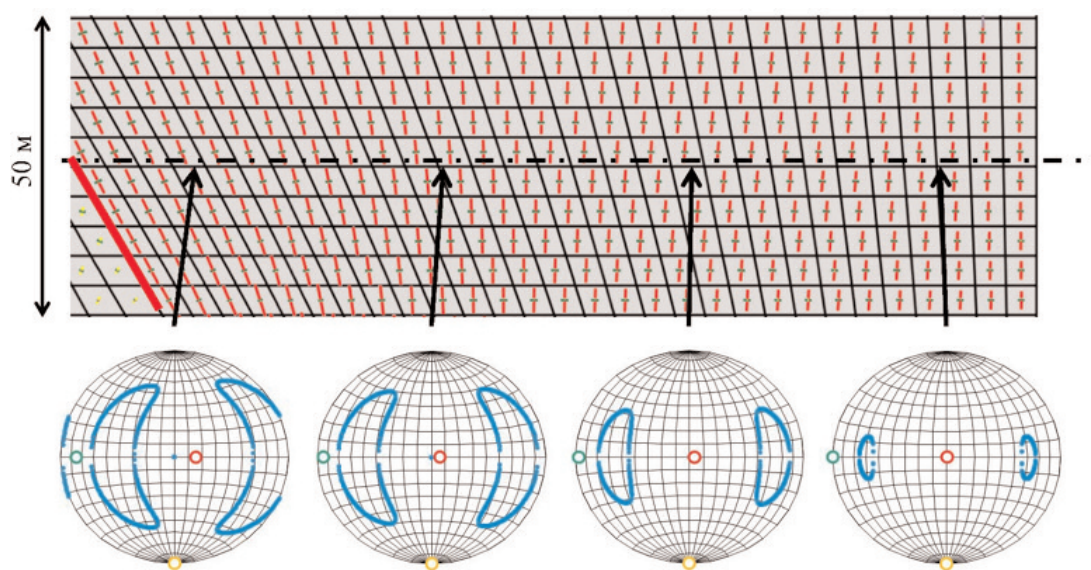


Рис. 3. Результаты расчета для разлома сбросового типа

В верхней части рис. 3 показана расчетная сетка и направления главных напряжений в каждом элементе:  $\sigma_1$  – красным цветом,  $\sigma_2$  – желтым и  $\sigma_3$  – зеленым. Из рис. 3 видно, что по мере приближения к разлому, сечение которого выделено красным цветом, вертикальная ось становится все дальше от одной из главных осей тензора напряжений.

В нижней части рис. 3 представлены результаты анализа трещиноватости. Результаты трехмерного геомеханического моделирования – пространственные распределения главных компонент тензора напряжений – напрямую использованы для расчета возможных пространственных ориентаций критически напряженных трещин. Множество направляющих косинусов  $l$  и  $n$  нормалей к критически напряженным трещинам определяется по известным главным напряжениям согласно неравенству (2). Далее знание пространственной ориентации главных осей тензора напряжений позволяет пересчитать эти направляющие косинусы в углы падения и азимутальные углы критически напряженных трещин, которые, в свою очередь, используются для построения стереограмм, показанных в нижней части рис. 3. Для построения этих стереограмм использована равновеликая азимутальная про-

екция Ламберта (подробное описание перехода от угла падения и азимута к координатам на проекции можно найти в пособии [15]). Кругами отмечены направления действия главных напряжений: красным – максимальное главное напряжение  $\sigma_1$ , желтым – промежуточное главное напряжение  $\sigma_2$ , зеленым – минимальное главное напряжение  $\sigma_3$ . Голубые точки ограничивают область, внутри которой находятся нормали к плоскостям, на которых выполняется неравенство (2), иными словами, область нормалей к критически напряженным и соответственно флюидопроводящим трещинам. Результаты представлены для четырех точек, расположенных вдоль направления действия  $\sigma_h$  и отдаленных от разлома на 10, 50, 100 и 150 м. На рис. 3 соответствующие стереограммы расположены слева направо.

Качественный анализ рис. 3 позволяет сделать два вывода. В первую очередь, видно, что по мере приближения к разлому преимущественная ориентация флюидопроводящих трещин изменяется вместе с направлениями главных напряжений. Действительно, преимущественный азимут трещин в данном случае остается постоянным, но диапазон возможных азимутов флюидопроводящих трещин расширяется по мере приближения к разлому. В свою очередь преимущественный угол наклона изменяется: из двух систем флюидопроводящих трещин у одной этот угол увеличивается, а у другой уменьшается, что приводит к несимметричному смещению области критически напряженных трещин на стереограмме. Второй важный вывод заключается в том, что по мере приближения к разлому увеличивается относительное количество флюидопроводящих трещин. Наряду с тем, что результаты расчетов показывают рост накопленных пластических деформации по мере приближения к разлому (в соответствии с данными работы [10] это связано с интенсивностью трещиноватости и трещинной пористостью), это позволяет подтвердить расчетами естественное заключение об улучшенных ФЕС трещиноватых пород в окрестностях крупных разломов.

На рис. 4 показана зависимость относительного количества флюидопроводящих трещин от расстояния до разлома. Относительное количество флюидопроводящих

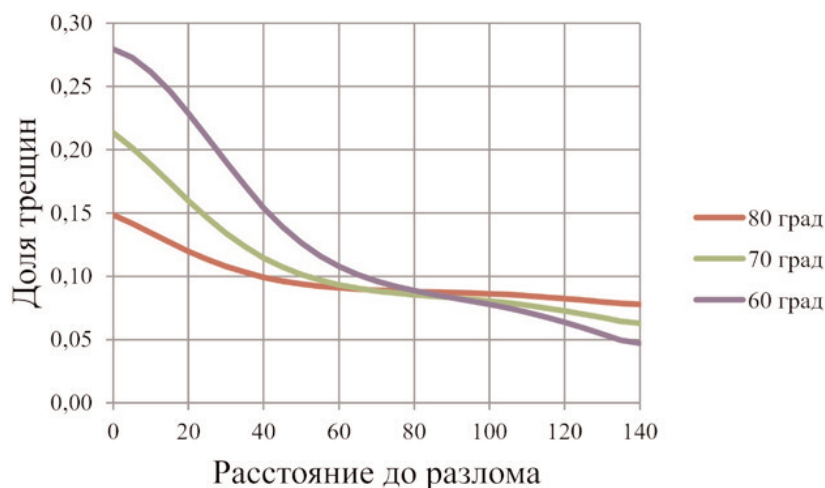


Рис. 4. Зависимость доли флюидопроводящих трещин от расстояния до разлома



трещин рассчитано как произведение доли критически напряженных трещин (площади области в пространстве  $l - n$ , для которой выполняется неравенство (2)) и накопленной пластической деформации, отнесенной к максимальному значению, полученному в окрестности разлома при расчете. Расчеты выполнены для набора пространственных ориентаций разлома (угла  $\alpha$  на рис. 2). Из рис. 4 видно, что по мере приближения к разлому доля флюидопроводящих трещин существенно возрастает. При этом чем более вертикально ориентирована плоскость разлома, тем меньшее влияние он оказывает на количество флюидопроводящих трещин.

На рис. 5 и 6 показаны распределения флюидопроводящих трещин в окрестности соответственно сдвигового разлома и разлома взбросовой кинематики. Значения главных напряжений остаются теми же, что и для рис. 3, однако направления

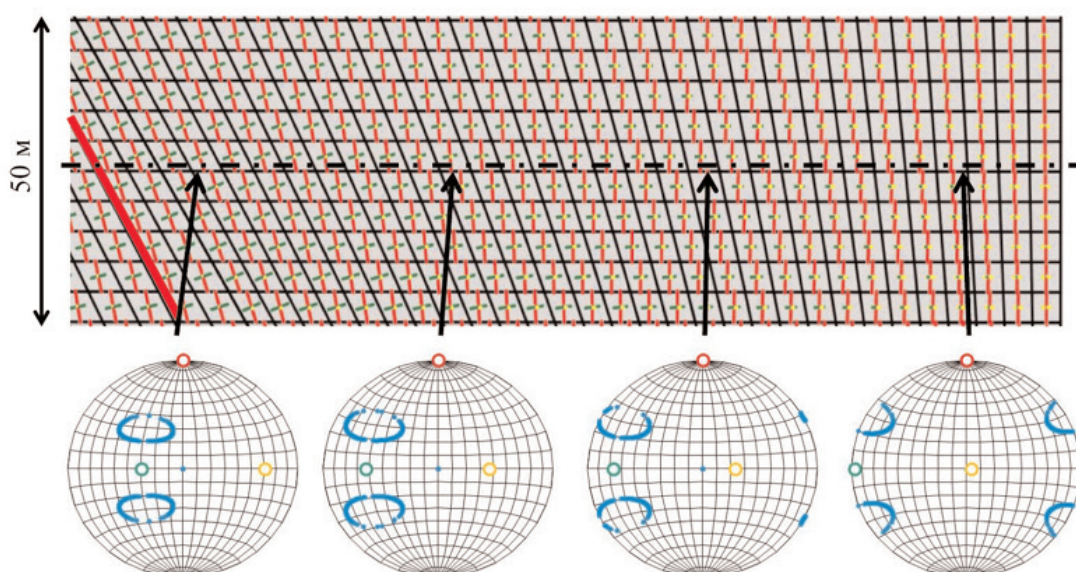


Рис. 5. Результаты расчета для разлома сдвигового типа

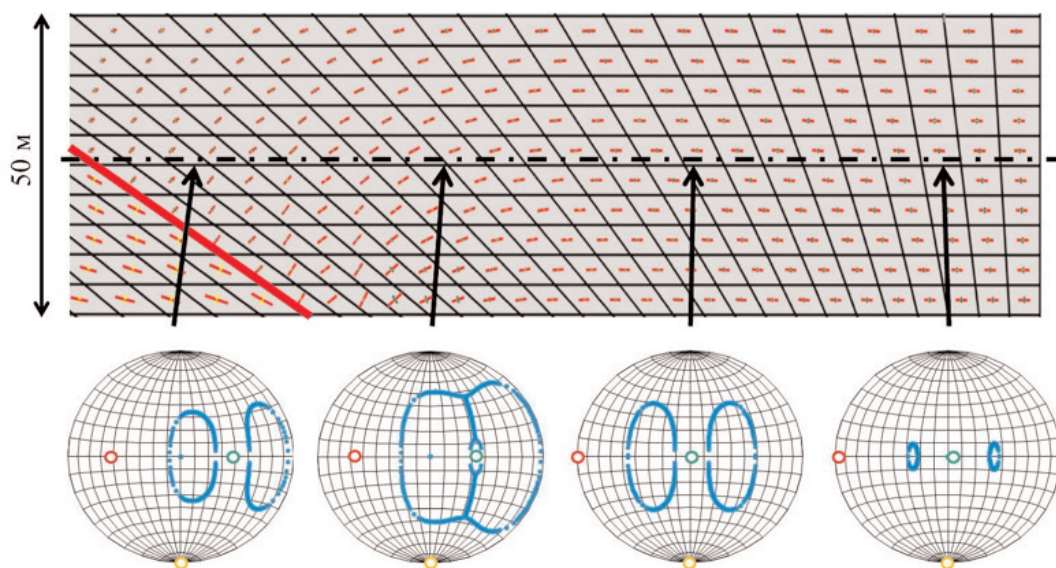


Рис. 6. Результаты расчета для разлома взбросового типа

их действия изменены. На рис. 5 реализуется обстановка сдвига: и максимальное, и минимальное главные напряжения действуют в горизонтальной плоскости. На рис. 6 показана обстановка взброса: максимальное главное напряжение действует в горизонтальной плоскости, минимальное направлено вертикально. В обоих случаях ориентация разлома относительно главных напряжений одинакова – угол  $\alpha = 60^\circ$  в соответствии со схемой, показанной на рис. 2. Этот угол выбран на основании множества расчетов, аналогичных тем, результаты которых представлены на рис. 4: угол  $60^\circ$  обеспечивает наибольшее влияние разлома на особенности флюидопроводящих трещин. Этот результат обусловлен выбором коэффициента трения ненарушенной породы  $\mu = 0,6$ . Коэффициент трения может быть определен как тангенс угла внутреннего трения, величина 0,6 соответствует углу  $30^\circ$ . В свою очередь угол внутреннего трения  $30^\circ$  приводит к образованию разломов с нормалью именно под углом  $60^\circ$  к направлению действия максимального главного напряжения (см. рис. 2) [14]. В результате наибольшее влияние на флюидопроводящие трещины оказывает разлом, который образовался бы при текущих напряжениях, что подтверждается результатами расчетов, выполненных для конкретных месторождений [10]. Все обозначения рис. 3 сохранены.

Результаты расчетов показывают, что разломы данных типов также влияют на зоны развитой трещиноватости, рассматриваемые с позиций критически напряженных трещин, однако наблюдаются некоторые различия. Сдвиговый разлом незначительно меняет относительное количество флюидопроводящих трещин, однако достаточно сильно изменяет их пространственную ориентацию. В свою очередь взбросовый разлом очень сильно изменяет относительное количество флюидопроводящих трещин, однако максимальное влияние оказывает на некотором отдалении (около 50 м, см. рис. 6).

Представленные расчеты выбраны как достаточно типичные, свойства пород и тектоническая обстановка соответствуют некоторым усредненным условиям, наблюдаемым на глубинах 2–3 км.

### **Обсуждение результатов**

Представленные в работе результаты расчетов, безусловно, не охватывают все многообразие физико-механических свойств, тектонических обстановок и пространственных ориентаций разломов. Тем не менее, поскольку выбраны достаточно представительные условия, можно утверждать, что полученные результаты позволяют сделать некоторые выводы о тенденциях в пространственной ориентации флюидопроводящих трещин и их распределении, следующих из использования гипотезы о наличии связи между критически напряженными и флюидопроводящими трещинами.

В первую очередь необходимо отметить, что разлом влияет как на относительное количество флюидопроводящих трещин, так и на их пространственную ориентацию. По мере приближения к разлому растет доля критически напряженных

трещин, а их пространственная ориентация оказывается тесно связанной с пространственной ориентацией самого разлома.

В то же время наблюдаемые закономерности существенно зависят от тектонических условий и типа самого разлома. Обнаружены следующие типовые особенности: разломы сдвигового типа относительно слабо влияют на долю флюидопроводящих трещин, но заметно изменяют их предпочтительную пространственную ориентацию; разломы сбросового и взбросового типов сильно влияют как на пространственную ориентацию, так и на относительную долю трещин, причем влияние разлома взбросового типа на долю флюидопроводящих трещин максимально на некотором отдалении от самого разлома.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности геомеханического моделирования для повышения эффективности разработки трещиноватых коллекторов. Результаты, представленные в данной работе, могут быть использованы для анализа трендов развития трещиноватости в окрестностях разломов на качественном уровне. Для получения достоверных прогнозов предпочтительной пространственной ориентации и положения флюидопроводящих трещин на конкретных объектах следует все же рекомендовать проведение полноценного трехмерного геомеханического моделирования. Необходимо отметить, что проведение четырехмерного геомеханического моделирования позволит прогнозировать не только исследуемые параметры флюидопроводящих трещин, но и изучить динамику их изменения в процессе разработки месторождения.

#### **Список литературы**

1. *Barton C.A., Zoback M.D., Moos D.* Fluid flow along potentially active faults in crystalline rocks // *Geology*. – 1995. – V. 23. – No. 8. – P. 683–686.
2. *In situ* stress and fracture permeability along the Stillwater fault zone, Dixie Valley, Nevada / S.H. Hickman, C.A. Barton, M.D. Zoback [et al.] // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Abstracts*. – 1997. – V. 34. – P. 3–4.
3. *Townend J., Zoback M.D.* How faulting keeps the crust strong // *Geology*. – 2000. – V. 28. – No. 5. – P. 399–402.
4. *Rogers S.* Critical stress-related permeability in fractured rocks. Fracture and in situ stress characterization of hydrocarbon reservoirs // *Geological Society, London, Special Publications*. – 2002. – V. – 209. – P. 7–16.
5. *Ligtenberg J.H.* Detection of fluid migration pathways in seismic data: implications for fault seal analysis // *Basin Research*. – 2005. – V. 17. – P. 141–153.
6. *The role of stress history on the flow of fluids through fractures* / S. Sathar, H.J. Reeves, R.J. Cuss, J.F. Harrington // *Mineralogical Magazine*. – 2012. – V. 76. – No. 8. – P. 3165–3177.
7. *Prediction of Physical-Mechanical Properties and In-Situ Stress State of Hydrocarbon Reservoirs from Experimental Data and Theoretical Modeling* / N. Dubinya, S. Tikhotsky, I. Bayuk [at al.] // *SPE-187823-MS*. – 2017.
8. *Bisdom K., Bertotti G., Nick H.M.* A geometrically based method for predicting stress-induced fracture aperture and flow in discrete fracture networks // *AAPG Bulletin*. – 2016. – V. 100. – No. 7. – P. 1075–1097.
9. *Schwab D.R., Bidgoli T.S., Taylor M.H.* Characterizing the Potential for Injection-Induced Fault Reactivation Through Subsurface Structural Mapping and Stress Field Analysis, Wellington Field,

Sumner County, Kansas // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2017. – V. 122. – P. 10, 132–10, 154.

10. *Localization and Characterization of Hydraulically Conductive Fractured Zones at Seismic Scale with the Help of Geomecha* / N. Dubinya, I. Bayuk, S. Tikhotskiy, O. Rusina // 80th EAGE Conference and Exhibition 2018. EAGE Extended Abstracts

11. *Coussy O. Poromechanics*. – John Wiley & Sons Ltd, 2004. – 315 p.

Coussy, 2004

12. *Kim J. Sequential Method for Coupled Geomechanics and Multiphase Flow: PhD Thesis*, 2010. – 274 p.

13. *Dubinya, N., Lukin, S., Chebyshev I. Two-Way Coupled Geomechanical Analysis of Naturally Fractured Oil Reservoir's Behavior Using Finite Element Method* // SPE-176631-MS. – 2015.

14. *Anderson E.M. The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain*. – Edinburgh, Oliver and Boyd, 1951. – 206 p.

15. *Snyder J.P. Map Projections: A Working Manual*. – U.S. Geological Survey, 1987. – 397 p.